



CF₄ Gaz Karışımlarında Delinme Geriliminin Ölçülmesi ve Hesaplanması

Hıdır DÜZKAYA^{1,*} ve Süleyman Sungur TEZCAN¹

¹ Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara

Öz

Tetrafluoromethane (CF₄), güç anahtarlama ve gaz izoleli kesicilerin endüstriyel uygulamalarında kullanılmasına rağmen güçlü bir sera gazıdır. Bu dezavantaj, CF₄'ün Argon, Nitrojen gibi çeşitli gazlar ile karışımları yapılarak giderilir. Gazların dielektrik özelliklerinin irdelenmesi, delinme gerilimlerinin ölçülmesi ile mümkündür. Oluşturulan deney düzeneğinde 1mm ile 5mm arasında farklı elektrot açıklıklarında, CF₄ gaz karışımlarının delinme gerilimleri ölçülmüştür. CF₄+SF₆ ve CF₄+Argon gaz karışımlarının ölçülen delinme gerilimleri literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılarak, hem ölçüm düzeneği hem de ölçüm metodu doğrulanmıştır. Ardından, literatürde henüz yayınlanmamış olan CF₄+N₂ gaz karışımının delinme gerilimleri farklı elektrot aralıklarında ölçülmüştür.

Makale Bilgisi

Başvuru: 07/02/2017

Düzeltilme: 13/06/2017

Kabul: 13/06/2017

Anahtar Kelimeler

Gaz deşarjları
CF₄
Argon
Nitrojen
Delinme Gerilimi Ölçümü

Keywords

Gas Discharge
CF₄
Argon
Nitrogen
Breakdown Voltage
Measurement

Measurement and Calculation of Breakdown Voltages in CF₄ Gas Mixtures

Abstract

Tetrafluoromethane (CF₄) has found industrial applications in power switching and gas insulated circuit breakers although it is considered to be a powerful greenhouse gas. This disadvantage can be overcome by mixing CF₄ with gases like Argon and Nitrogen. In order to investigate the dielectric properties of the gases, the breakdown voltages must be measured. An experimental system is used to measure the breakdown voltages of CF₄ gas mixtures for different electrode separation between 1 mm and 5mm. By comparing the measured breakdown voltages of CF₄+SF₆ and CF₄+Argon gas mixtures with the corresponding values in the literature, the measurement method and experimental system are verified. Then, the breakdown voltages of CF₄+N₂ gas mixture is measured, which is lack in the literature.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

CF₄, düşük toksik seviyesi ve göreceli olarak düşük maliyeti ile öne çıkan bir dielektrik gazdır [1]. Atmosferik yarı yaşam ömrü 50000 yıldan fazla olan güçlü bir sera gazı olmasına rağmen [2], güç anahtarlama uygulamalarında, gaz izoleli kesicilerde, plazmalarda [1] ve parçacık dedektörlerinde [3–5] kullanılmaktadır. Sera gazı etkisi nedeniyle, CF₄ gazının başka gazlarla karıştırılarak CF₄ miktarının kullanımını sınırlandırmaya çalışılmaktadır.

Bu karışımlarda kullanılan gazlardan biri olan SF₆ gazının da -30°, -40° gibi düşük sıcaklıklarda kesme kapasitesi azalmaktadır. Bu yüzden, SF₆ gazı CF₄ veya N₂ gibi gazlar ile karıştırılmaktadır. CF₄'ün sıvılaştırma sıcaklığı, N₂'e göre daha düşük olduğundan düşük sıcaklıklarda CF₄/SF₆ gaz karışımının kullanımı daha çok tercih edilmektedir. CF₄/SF₆ gaz karışımının, SF₆/N₂ gaz karışımına göre bir diğer avantajı da, ark söndürme kapasitesinin çok daha iyi olmasıdır.

Argon, düşük ark endüktansı, yüksek akımları iletme özelliği ve yüksek sıcaklıklardaki ısı kararlılığı nedeniyle lazerlerde, plazmalarda, ark kaynaklarında, çelik üretiminde, ısı işlemlerde, elektronik imalat sanayinde, plazmaların laboratuvar çalışmalarında, darbe güç anahtarlama uygulamalarında ve toz metalürjisi alanlarında kullanılmaktadır [6–9]. Argon'un dezavantajı dielektrik dayanımının düşük

*İletişim yazarı, e-mail: hduzkaya@gazi.edu.tr

olmasıdır [10]. CF₄ gibi elektronegatif bir gaz ile karışımı yapılarak bu dezavantaj giderilebilmektedir. CF₄+Argon gaz karışımının, elektron çıkış parametreleri ve delinme gerilimleri literatürde incelenmiştir [11].

Nitrojen gazı, her ne kadar elektronegatif bir gaz olmasa da elektronların yavaşlamasına yol açtığından dielektrik dayanımı yani delinme gerilimi görece olarak yüksektir [12]. 300kPa basıncın altında, düzgün elektrik alan dağılımında, nitrojenin delinme gerilimi SF₆'nın delinme geriliminin 0.33 katıdır [13]. Nitrojen gazının delinme gerilimi (a.c. veya d.c. gerilim altında), sabit elektrot aralığında, basınç arttıkça artmaktadır fakat 1MPa basınç civarında saturasyona girmektedir [13]. Nitrojen, ucuz, alev almaz, zehirsiz, çevresel etkileri kabul edilebilir bir asal gaz olduğundan dielektrik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [14–16]. Nitrojen gazının, elektronegatif gaz karışımlarında kullanılması ile hem delinme gerilimi yüksek hem de çevresel olumsuz etkileri daha az gaz karışımları üretilebilmektedir [17, 18]. Bir diğer avantajı ise, nitrojenin yerel düzgün olmayan elektrik alan dağılımından, yani yüzey pürüzlüğünden, daha az etkilendiğinden bu tip geometrilerde kullanılabilmesidir [19, 20].

Bu çalışmada, %20 CF₄ + %80 N₂, %40 CF₄ + %60 N₂, %60 CF₄ + %40 N₂, %80 CF₄ + %20 N₂ gaz karışımlarının delinme gerilimleri, 0.5 bar basınçta ve 1-5mm elektrot açıklığında ölçülmüştür. CF₄ + N₂ gaz karışımı ile ilgili ne teorik ne de pratik bir çalışma literatürde olmadığından, bu çalışma ile bu eksiklik giderilmeye çalışılmaktadır. CF₄ ve N₂'nin delinme gerilimleri birbirine yakındır. Bu nedenle, farklı uygulamalarda kullanıma potansiyeli taşıyan CF₄ + N₂ gaz karışımının, delinme gerilimlerinin ölçülmesi ile literatüre katkı sağlanmaktadır.

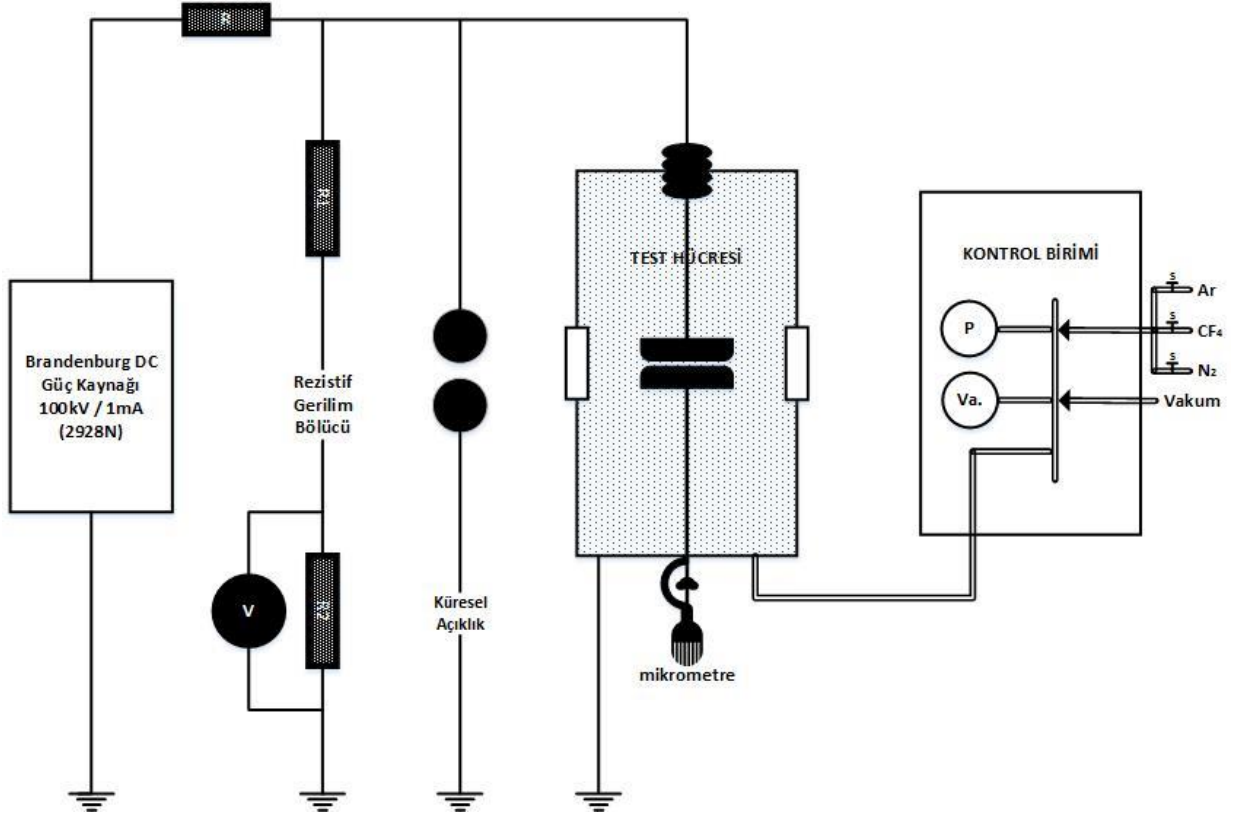
2. DENEYSEL PROSEDÜR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Deneyler boyunca 300mm yüksekliğinde 200mm çapında paslanmaz çelikten bir test hücresi kullanılmaktadır. Test hücresi ile güç kaynağı arasındaki bağlantı, bir yüksek gerilim bushingi vasıtasıyla sağlanmaktadır. 30 mm çapında ve 5mm kalınlığında iki cam pencere ile test hücresi içerisindeki elektrotların yerleşimi gözlemlenmektedir. Paslanmaz çelikten 35mm çapında iki elektrot, 90° Rogowski profil şeklinde üretilmiş ve birbirine paralel düzlemlere yerleştirilmiştir. Bu elektrotlar kalıcı toprak potansiyelinde olan test hücresinden elektriksel olarak izoledir. Her iki elektrot her bir ölçüm seti öncesinde parlatılmakta ve temizlenmektedir. Bunlardan birisi, bir mikrometre kullanılarak 1mm ile 5 mm arasında istenilen herhangi bir elektrot açıklığına göre ayarlanabilen hareketli bir platforma montelidir. Elektrot açıklığı sıfıra getirilerek test hücresinin çalışma basıncı ayarlanmaktadır. Test hücresinin içi vakum pompası kullanılarak 9.33Pa basıncına kadar düşürülebilmektedir.

Farklı gaz karışımların deşarj davranışlarını çalışmak için, bu gazlar kısmi basınç oranlarına göre ayarlanarak karıştırılmaktadır. Test hücresi öncelikle vakumlanıp, karışımın en düşük bileşenine karşılık gelen gaz ile bu gazın kısmi basınç değerine kadar doldurulmaktadır. Daha sonra, ikinci en düşük kısmi basınçlı gaz ilave edilmektedir. Son işlem olarak, üçüncü gaz, istenilen gaz basıncına kadar test hücresine eklenmektedir. Toplam gaz basıncının düşük olduğu ölçüm uygulamalarında, üçlü karışım bu bileşenlerin istenilen kısmi basınçlarına göre yüksek basınçta hazırlanıp, istenilen gaz basıncına kadar boşaltılarak ayarlanabilmektedir.

Yüksek gerilimin çıkışı, 1kV'dan 100kV'a kadar değişen sürekli bir doğru-akım güç kaynağıdır ve dalgalanma ile regülasyondan kaynaklanan gerilimdeki değişim maksimum yük akımında ±%0.1 aralığındadır. Çıkış gerilimi bir rezistif bölücüye bağlı dijital bir voltmetre kullanılarak ölçülmektedir. Gerilim ölçme sistemi, küresel açıklıkların ayarlandığı standart bir konfigürasyona göre uygun bir şekilde kalibre edilmektedir [21].

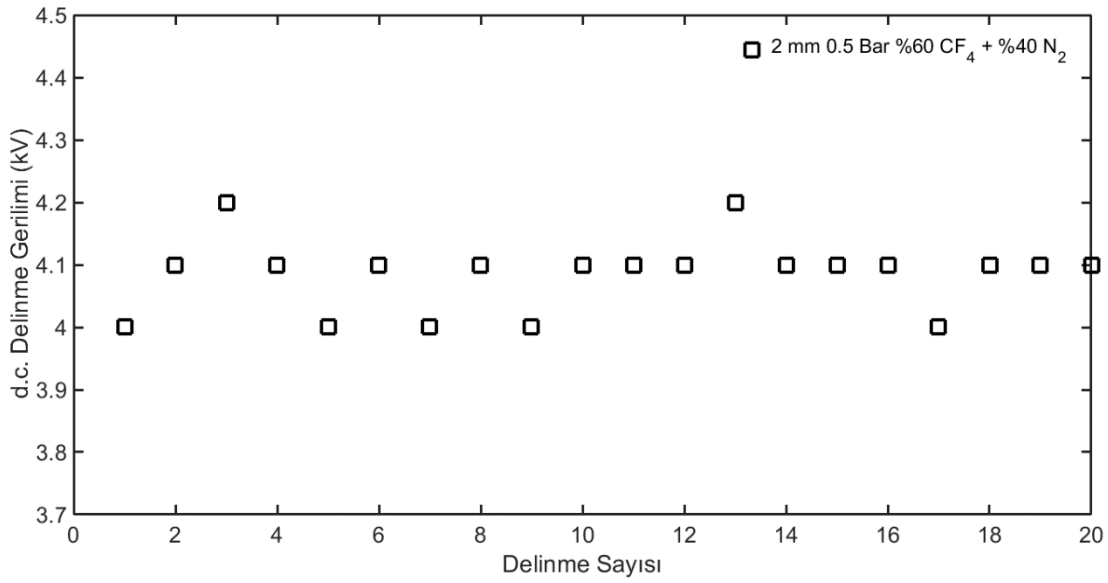
Deney düzeneğinin şematik diyagramı ve fotoğrafı sırasıyla Şekil 1 ve 2'de görülmektedir. Uygulanan gerilimin yükselme hızı standartlara uygun bir şekilde deneyler boyunca 500V/s olarak ayarlanmaktadır [22]. Yeni parlatılmış elektrotlar ile %60 CF₄ + %40 N₂ karışımı için 2mm elektrot açıklık, 0.5 bar basınçta delinme geriliminin deneysel dağılımı Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Schematic diagram of the experimental set up)



Şekil 2. Deney düzeneğinin fotoğrafı (Photograph of the experimental set up)



Şekil 3. 2mm, 0.5 Bar basınçta %60 CF₄ + %40 N₂ karışımının delinme gerilimi dağılımı (Conditioning for 60% CF₄ + 40% N₂ mixture at 2 mm and 0.5 Bar)

3. HESAPLAMA METODU (CALCULATION METHOD)

Bu çalışmada ele alınan CF₄ gaz karışımlarının, elektron çığ parametreleri, Boltzman eşitliğinin çözümü kullanılarak sayısal olarak hesaplanmaktadır. Başka çalışmalarda da verildiği gibi [11, 23, 24], Boltzman eşitliği Eş.1'de verilmektedir. Tanımlanan enerji dağılım fonksiyonu sonlu-farklar metodu kullanılarak çözülmektedir [25]. Önceki çalışmalarımıza benzer biçimde [11, 23, 24], nümerik çözümler elektron enerji dağılım fonksiyonunun iki-terime genişletilmesine dayanmaktadır,

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{E}{N}\right)^2 \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_m^e} \frac{df}{d\varepsilon} \right) + \left(\frac{eE}{N}\right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N}\right) \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_m^e} f \right) + \left(\frac{eE}{N}\right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N}\right) \frac{\varepsilon}{3Q_m^e} \frac{df}{d\varepsilon} + \left(\frac{\alpha - \eta}{N}\right)^2 \frac{\varepsilon}{3Q_m^e} \\
& + \frac{2m}{M} \frac{d}{d\varepsilon} (\varepsilon^2 Q_m f) + (\varepsilon + \varepsilon_v) Q_v (\varepsilon + \varepsilon_v) f(\varepsilon + \varepsilon_v) - \varepsilon Q_v (\varepsilon) f(\varepsilon) \\
& + (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) Q_{ex} (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) f(\varepsilon + \varepsilon_{ex}) - \varepsilon Q_{ex} (\varepsilon) f(\varepsilon) \\
& + \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) Q_i \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) \\
& + \frac{1}{1 - \Delta} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) Q_i \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) - \varepsilon Q_i (\varepsilon) f(\varepsilon) \\
& - \varepsilon Q_a (\varepsilon) f(\varepsilon) = 0
\end{aligned} \tag{1}$$

burada, E uygulanan elektrik alan yoğunluğu, N gaz molekül yoğunluğu, e ve m elektron yükü ve kütlesidir. M moleküler kütle, f elektron enerji dağılım fonksiyonu, α , η ve $\bar{\alpha}$ sırasıyla iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayıdır. Q_m , Q_v , Q_{ex} , Q_a ve Q_i sırasıyla momentum transfer, titreşim, uyartım, yapışma ve iyonlaşmanın elektron çarpışma kesit alanını ifade etmektedir ve

$$Q_m^e = Q_m + Q_v + Q_{ex} + Q_a + Q_i \tag{2}$$

momentum transfer için efektif çarpışma kesit alanıdır. Ayrıca, Eş.(1)'de, ε_v , ε_{ex} ve ε_i sırasıyla titreşim, uyartım ve iyonlaşma çarpışma kesitinin eşik enerjileridir, Δ iyonlaşma gerçekleştiren bir çarpışma sonrası

birincil ve ikincil elektronlar arasındaki enerjinin paylaşımını ifade ederken; Δ bu çalışmada 0.5 olarak kabul edilmektedir, bunun anlamı ikinci elektronun iyonların saçılması sonrası birinci elektronun enerjisinin yarısını paylaşmasıdır. Son olarak, Eş.1'de ε , u hızında bir elektronun kinetik enerjisini vermektedir,

$$\varepsilon = \frac{1}{2}mu^2 \quad (3)$$

Bu çalışmada, CF_4 çarpışma kesitlerini Kurihera ve arkadaşları [26], Argon çarpışma kesitleri Hayashi [27] ve Yanguas-Gil ve arkadaşları [28], Nitrojen çarpışma kesitleri Phelps ve Pitchford [29] makalelerinden alınmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

4.1. CF_4+Ar Gaz Karışımı (CF_4+Ar Gas Mixture)

$CF_4+Argon$ gaz karışımında, iyonlaşma katsayısının yapışma katsayısına eşit olduğu gaz molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan değerleri limit elektrik alan değerleri $(E/N)_{limit}$ olup [11] referansında verilmektedir. Bu değerler kullanılarak, delinme gerilimleri hesaplanabilmektedir. Bunun için öncelikle, gaz molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan değerleri Eş. 4'e göre gaz basıncına indirgenmektedir [30]. Bu adımdan sonra, elde edilen değerler, yani gaz basıncına indirgenmiş limit elektrik alan değerleri, $(E/p)_{limit}$, Eş. 5'e göre, gaz basıncı (p) ve elektrot aralığı (d) ile çarpılarak delinme gerilim değerleri (V_{sc}) hesaplanmaktadır [11]. Tablo 1'de, 0.5 bar basınçta, 0.5 cm elektrot aralığında $CF_4+Argon$ gaz karışımında ölçülen ve hesaplanan delinme gerilimlerinin karşılaştırılmaktadır. Yüksek gerilim laboratuvarında oluşturulan düzenek ile %20, %40, %60 ve %80 CF_4 için 1-5mm arasında 1mm'lik bütün elektrot aralıklarında, 0.5 bar basınçta delinme gerilimleri ölçülmektedir (V_{sm}). Ölçülen ile hesaplanan delinme gerilimleri arasındaki yüzde hatanın mutlak değerleri, Eş. 6'ya göre hesaplanmakta ve bu oran %5'in altında olduğundan kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunmaktadır.

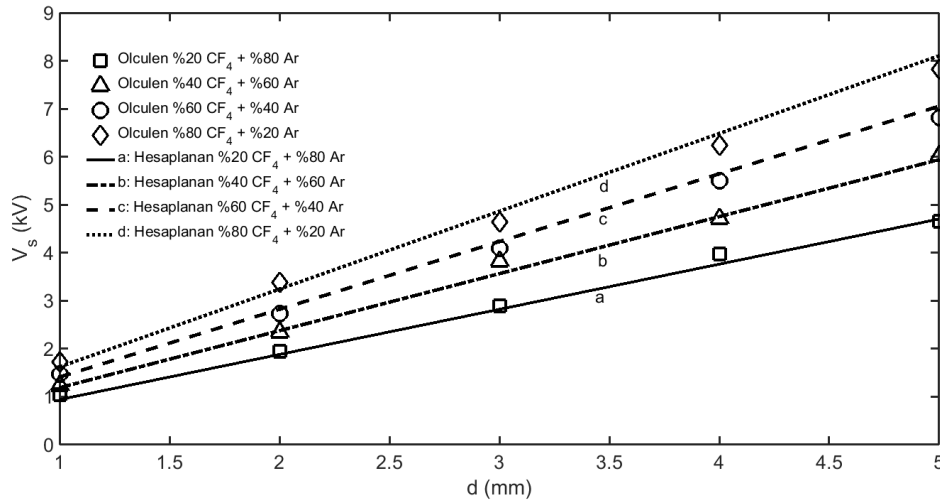
$$(E/p)_{limit} = 0.02475 (E/N)_{limit} \quad (4)$$

$$V_{sc} = (E/p)_{limit} p d \quad (5)$$

$$Yüzde Hatanın Mutlak Değeri = |(V_{sm} - V_{sc})/V_{sc} * 100| \quad (6)$$

Tablo 1. $CF_4+Argon$ gaz karışımının 0.5 bar gaz basıncı, 2mm elektrot açıklığında ölçülen ve hesaplanan delinme gerilimlerinin karşılaştırılması (Compare of calculated and measured of breakdown voltages in $CF_4+Argon$ gas mixture at 2 mm and 0.5 bar)

Gaz Karışımı	$(E/N)_{limit}$	$(E/p)_{limit}$	p	d	V_{sc}	V_{sm}	% Hata
%20 CF_4+ %80 Ar	76	1.88	0.5	2.0	1.88	1.94	3.19
%40 CF_4+ %60 Ar	96	2.38	0.5	2.0	2.38	2.35	1.26
%60 CF_4+ %40 Ar	114	2.82	0.5	2.0	2.82	2.73	3.19
%80 CF_4+ %20 Ar	131	3.24	0.5	2.0	3.24	3.38	4.32



Şekil 4. 1–5 mm, 0.5 Bar basınçta %20 CF₄ + %80 Ar, %40 CF₄ + %60 Ar, %60 CF₄ + %40 Ar ve %80 CF₄ + %20 Ar karışımının ölçülen ve hesaplanan delinme gerilimleri (The calculated and measured of breakdown voltages in 20% CF₄ + 80% Ar, 40% CF₄ + 60% Ar, 60% CF₄ + 40% Ar ve 80% CF₄ + 20% Ar at 1–5 mm and 0.5 Bar)

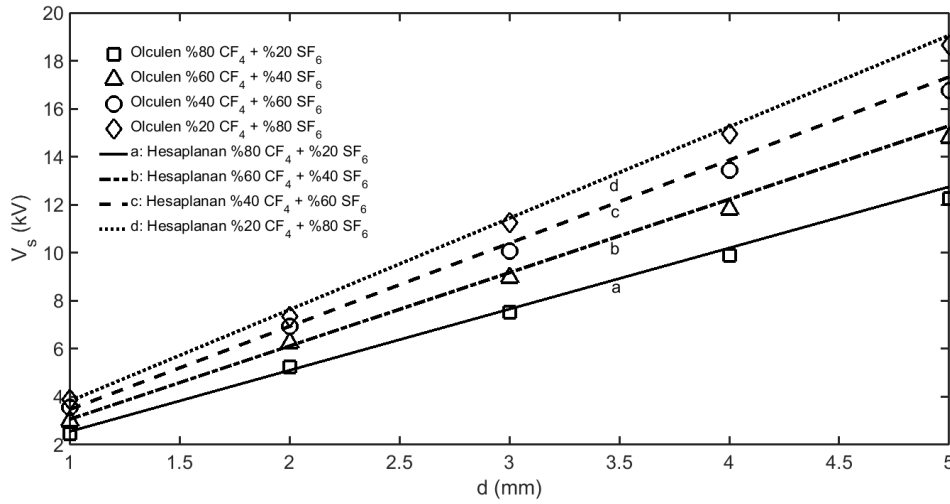
0.5 Bar basınçta, elektrot aralığını 1mm'den başlayarak 1mm aralıkla 5mm'e kadar değiştirilmekte ve delinme gerilimleri hazırlanan düzenele ölçülmektedir. Ölçüm sonuçları, Boltzmann denklemi analizi ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmakta ve aralarındaki uyum Şekil 4'de görülmektedir. Şekil 4'e göre; elektrot aralığı artırıldıkça delinme gerilimi artmakta, gaz karışımındaki CF₄ miktarı ile doğru orantılı olarak gaz karışımının elektronegatifliği de değişmektedir. Karışım içerisinde CF₄ gaz oranının artması, elektronegatifliği de arttırmakta, dolayısıyla dielektrik dayanım yani delinme gerilimi yükselmektedir.

4.2. CF₄+SF₆ Gaz Karışımı (CF₄+SF₆ Gas Mixture)

CF₄+SF₆ gaz karışımının delinme gerilimi ölçülmekte ve elde edilen sonuçlar literatürde yayınlanan sonuçlar ile Tablo 2 ve Şekil 5'de karşılaştırılmaktadır. %20, %40, %60 ve %80 SF₆'da, elektrot aralığı 1mm'den başlayarak 1mm aralıkla 5mm'e kadar değiştirilmekte ve delinme gerilimleri ölçülmektedir. Bu değerler, hesaplanan delinme gerilimleri ile karşılaştırılmakta, her bir karışım için bütün elektrot aralıklarında yüzde hatanın mutlak değerleri hesaplanmakta ve bunun ortalaması alınarak o karışımın yüzde hatalarının mutlak değerlerinin ortalaması elde edilmektedir. Yüzde hatalarının mutlak değerlerinin ortalamaları, %5'ten küçük olduğundan, ölçülen delinme gerilimleri ve ölçüm metodu doğrulanmaktadır.

Tablo 2. 0.5 bar, 2 mm elektrot aralığında CF₄+SF₆ gaz karışımında ölçülen ve hesaplanan delinme gerilimlerinin karşılaştırılması (Compare of calculated and measured of breakdown voltages in CF₄+ SF₆ gas mixture at 2 mm and 0.5 bar)

Gaz Karışımı	(E/N) _{limit}	(E/p) _{limit}	p	d	V _{sc}	V _{sm}	% Hata
%20 CF ₄ + %80 SF ₆	308	7.62	0.5	2.0	7.62	7.34	3.67
%40 CF ₄ + %60 SF ₆	280	6.93	0.5	2.0	6.93	6.94	0.14
%60 CF ₄ + %40 SF ₆	247	6.11	0.5	2.0	6.11	6.25	2.29
%80 CF ₄ + %20 SF ₆	206	5.10	0.5	2.0	5.10	5.24	2.74

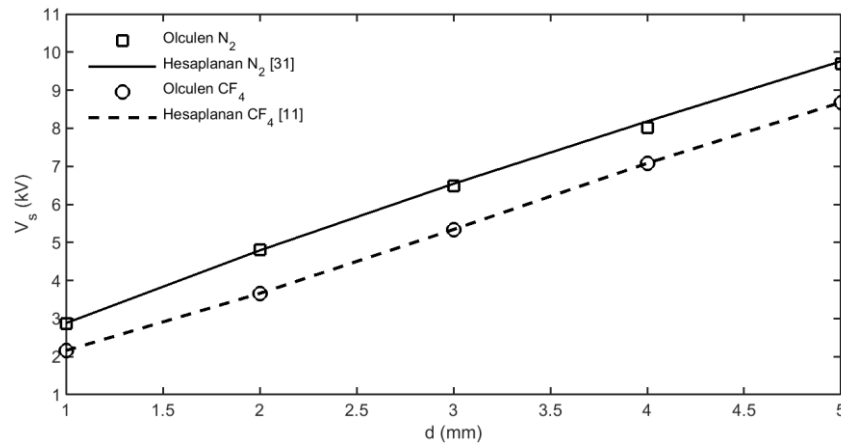


Şekil 5. 1–5 mm, 0.5 Bar basınçta %20 CF₄ + %80 SF₆, %40 CF₄ + %60 SF₆, %60 CF₄ + %40 SF₆ ve %80 CF₄ + %20 SF₆ karışımının ölçülen ve hesaplanan delinme gerilimleri (The calculated and measured of breakdown voltages in 20% CF₄ + 80% SF₆, 40% CF₄ + 60% SF₆, 60% CF₄ + 40% SF₆ ve 80% CF₄ + 20% SF₆ at 1–5 mm and 0.5 Bar)

Şekil 5’de %20, %40, %60 ve %80 CF₄ oranlarında, farklı elektrot aralıklarında, 0.5 bar basınçta, delinme gerilimleri ölçülmektedir. Boltzmann denklemi analizi ile elde edilen sonuçlar, çizgi şeklinde; ölçüm sonuçları geometrik işaret şeklinde gösterilmektedir. SF₆ gazının limit elektrik alan değeri (360Td), CF₄ gazının limit alan değerinden (144Td) çok daha yüksek olduğundan, karışımdaki SF₆ miktarı artırdıkça delinme gerilimi yükselmektedir [24].

4.3. CF₄+N₂ Gaz Karışımı (CF₄+N₂ Gas Mixture)

Literatürde CF₄+N₂ gaz karışımının delinme gerilimi ölçümü ile ilgili yayınlanmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bir alternatif elektronegatif gaz karışımı olan CF₄+N₂ gaz karışımı ile ilgili bu eksikliğin giderilmesi için oluşturulan test düzeneği ile farklı elektrot aralıklarında 0.5 bar basınçta delinme gerilimleri ölçülmektedir. Henüz literatürde bu konuda çalışma olmadığından, CF₄+N₂ gaz karışımı için ölçülen delinme gerilimi değerleri literatür sonuçları ile karşılaştırılamamaktadır. Bu yüzden, ölçülen CF₄+N₂ gaz karışımı delinme gerilimi değerleri, öncelikle saf CF₄ ve saf N₂ delinme gerilimleri, sonrasında da hesaplanan CF₄+N₂ gaz karışımı delinme gerilimi değerleri ile karşılaştırılarak ölçümün güvenilirliği test edilmektedir.



Şekil 6. 1–5 mm, 0.5 Bar basınçta saf CF₄ ve saf N₂’nin ölçülen ve hesaplanan delinme gerilimleri (The calculated and measured of breakdown voltages in pure CF₄ and pure N₂ at 1–5 mm and 0.5 Bar)

Tablo 3. 0.5 bar, 1 – 5 mm elektrot aralığında CF₄+N₂ gaz karışımında ölçülen delinme gerilimleri (The measured of breakdown voltages in CF₄+N₂ gas mixture at 1–5 mm and 0.5 Bar)

p	d	%100 N ₂	%20 CF ₄ + %80 N ₂	%40 CF ₄ + %60 N ₂	%60 CF ₄ + %40 N ₂	%80 CF ₄ + %20 N ₂	%100 CF ₄
0.5	1.0	2.88	2.68	2.50	2.28	2.08	1.78
0.5	2.0	4.79	4.54	4.38	4.08	3.86	3.56
0.5	3.0	6.54	6.26	6.06	5.78	5.56	5.35
0.5	4.0	8.18	7.74	7.62	7.48	7.36	7.13
0.5	5.0	9.76	9.36	9.22	9.10	8.96	8.91

CF₄+N₂ gaz karışımının delinme gerilimleri, %20, %40, %60 ve %80 CF₄ oranlarında, 0.5 bar basınçta ve farklı elektrot aralıklarında ölçülmektedir. CF₄+N₂ gaz karışımının delinme gerilimleri, literatürde yer almadığından, pratik bir çalışma ile karşılaştırılmamaktadır. Bu yüzden, CF₄+N₂ gaz karışımlarının delinme gerilimi ölçüm sonuçları, saf CF₄ ve saf N₂ gazlarının delinme gerilimleri ile kontrol edilmekte, bu iki delinme gerilimi arasında olduğu tespit edilerek doğrulanabilmektedir.

Saf N₂ gazının delinme gerilimi [31] referansındaki hesaplamaya göre hesaplandığında ve saf CF₄ gazının delinme gerilimi [11] referansındaki E/N_{limit} değerine göre hesaplandığında, basınç ile elektrot aralığının çarpımının 3.97 mmbar değerinde ve daha büyük değerlerde, CF₄ delinme gerilimi, N₂ delinme geriliminden büyük olmaktadır. Bu değer altında, N₂ delinme gerilimi, CF₄ delinme geriliminden büyüktür. Bu çalışma kapsamında alınan ölçümler, 0.5-2.5 mmbar aralığında olduğu için, CF₄'ün delinme geriliminin N₂'nin delinme gerilimini geçtiği noktayı göremesek de; pd çarpımının büyümesi ile birlikte CF₄ gaz karışımlarının delinme gerilimlerinin birbirine yaklaştığı tespit edilebilmektedir.

Nitrojen gazının delinme gerilimini bulmak için öncelikle, Eş. 7'ye göre öncelikle k parametresi, basınç ile elektrot aralığının çarpımı ile bulunur, ardından delinme gerilimi, Eş. 8'e göre hesaplanır [31].

$$k = 2.4043 (pd)^{0.1030} \quad (7)$$

$$V_{sc} N_2 = \frac{2565 pd}{\ln(pd) + k} \quad (8)$$

CF₄ gazının (E/N)_{limit} değeri 144Td'dur [11] ve CF₄'ün delinme gerilimleri Eş. 4 ve Eş. 5 ile hesaplanır. CF₄+N₂ gaz karışımının delinme gerilimi ise her bir gazın karışım oranı ile delinme geriliminin çarpılıp toplanması ile Eş. 9'daki gibi kabaca hesaplanır.

$$V_{sc} CF_4 + N_2 = (CF_4 \text{ oranı})(V_S CF_4) + (N_2 \text{ oranı})(V_S N_2) \quad (9)$$

Tablo 4. 0.5 bar, 1 – 5 mm elektrot aralığında %20 CF₄ + %80 N₂ ve %40 CF₄ + %60 N₂ gaz karışımında ölçülen ile hesaplanan delinme gerilimlerinin karşılaştırılması (The measured and calculated of breakdown voltages in 20% CF₄ + 80% N₂ and 40% CF₄ + 60% N₂ gas mixture at 1–5 mm and 0.5 Bar)

p	d	%20 CF ₄ + %80 N ₂			%40 CF ₄ + %60 N ₂		
		V _{sc}	V _{sm}	% Hata	V _{sc}	V _{sm}	% Hata
0.5	1.0	2.66	2.68	0.75	2.44	2.5	2.46
0.5	2.0	4.55	4.54	0.22	4.3	4.38	1.86

0.5	3.0	6.30	6.26	0.63	6.06	6.06	0.00
0.5	4.0	7.97	7.74	2.89	7.76	7.62	1.80
0.5	5.0	9.59	9.36	2.40	9.42	9.22	2.12

Tablo 5. 0.5 bar. 1 – 5 mm elektrot aralığında %60 CF₄ + %40 N₂ ve %80 CF₄ + %20 N₂ gaz karışımında ölçülen ile hesaplanan delinme gerilimlerinin karşılaştırılması (The measured and calculated of breakdown voltages in 60% CF₄ + 40% N₂ and 80% CF₄ + 20% N₂ gas mixture at 1–5 mm and 0.5 Bar)

p	d	%60 CF ₄ + %40 N ₂			%80 CF ₄ + %20 N ₂		
		V _{sc}	V _{sm}	% Hata	V _{sc}	V _{sm}	% Hata
0.5	1.0	2.22	2.28	2.70	2.00	2.08	4.00
0.5	2.0	4.06	4.08	0.49	3.81	3.86	1.31
0.5	3.0	5.82	5.78	0.69	5.58	5.56	0.36
0.5	4.0	7.55	7.48	0.93	7.34	7.36	0.27
0.5	5.0	9.25	9.1	1.62	9.08	8.96	1.32

Tablo 4 ve 5'te 0.5 bar, 1 – 5 mm elektrot aralığında CF₄+N₂ gaz karışımında ölçülen ile hesaplanan delinme gerilimlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu sonuçlara göre, bütün hatalar yüzde 5'in altındadır ve böylelikle ölçümlerin doğruluğu ispatlanmaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Yüksek gerilim sistemlerinde, yalıtkan malzeme olarak kullanılan CF₄ gazının farklı gazlarla karıştırılmasına yaygın olarak rastlanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, CF₄ + SF₆ ve CF₄ + Ar gaz karışımlarının delinme gerilimleri ölçülmekte, literatür ve hesaplama sonuçları ile uyumlu değerler elde edilmektedir. Çalışma kapsamında, yalıtkanlık seviyeleri birbirine yakın olan ve bu sebeple farklı yüksek gerilim uygulamalarında birbiri yerine kullanılabilir CF₄ ve N₂ gazlarının delinme gerilimleri ölçülmekte ve literatür ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen uyumlu sonuçlar ışığında, literatürde henüz yer almayan, CF₄ + N₂ gaz karışımının delinme gerilimleri ölçülmektedir. Bu değerler, saf CF₄ ve saf N₂ gazlarının delinme gerilimi değerleriyle uyumludur. Birbirine yakın delinme gerilim değerleri nedeniyle farklı uygulamalarda, kullanılma potansiyeli taşıyan CF₄ + N₂ gaz karışımının delinme gerilimlerinin ölçülmesi literatüre katkı sağlamaktadır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

Sembol	Birim	Açıklama
<i>E</i>	V.cm ⁻¹	Elektrik Alan
<i>N</i>	cm ⁻³	Gaz Molekül Yoğunluğu
<i>p</i>	bar	Basınç
<i>d</i>	mm	Elektrot Açıklığı
<i>V_{sc}</i>	kV	Hesaplanan Delinme Gerilimi
<i>V_{sm}</i>	kV	Ölçülen Delinme Gerilimi

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, 113E493 nolu proje kapsamında TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Kurumu) tarafından desteklenmektedir. Desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nikitovic Z., Stojanovic V., Petrovic Z.L., "On the Role of Radicals in Kinetics of Plasma Etchers in Ar/CF₄ Mixtures", *Acta Physica Polonica A*, 115, 4, 765-767, 2009.
- [2] Christophorou L.G., Olthoff J.K., Rao M.V.V.S., "Electron interactions with SF₆", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 25, 1341-1388, 1996.
- [3] James D.R., Christophorou L.G., Mathis R.A., "New Unitary and Multicomponent Gaseous Dielectrics", *Gaseous Dielectrics II*, Editor: Christophorou L.G., Pergamon Press, New York, A.B.D., 115, 1980.
- [4] Kopp M.K., Valentine K.H., Christophorou L.G., Carter J.G., "New Gas Mixture Improves Performance of ³He Neutron Counters", *Nucl. Instrum. Methods*, 201, 2-3, 395-401, 1982.
- [5] Yamashita T., Kurashige H., Morii M.M., Nakamura T.T., Nomura T., Sasao N., Shibata K., Fukushima Y., Ikegami Y., Kobayashi H., Taniguchi T., "Measurements of Electron Drift Velocities and Positive Ion Mobilities for Gases Containing CF₄ II", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 317, 1-2, 213-220, 1992.
- [6] Khechen W, Laghari J.R., "Breakdown Studies of SF₆/Argon Gas Mixtures", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 24, 6, 1141-1146, 1989.
- [7] Maxwell Laboratories Inc., Bulletin # MLB-2138A1, 1982.
- [8] Erden, M. A., "Toz Metalürjisi ile Üretilen Çeliklerde Nikel İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin Araştırılması", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4, 4, 241-245, 2016.
- [9] Aksöz S., Özdemir A.T., Bostan B., "Alloyed AA2014 Aluminium Powders Synthesized With Carbon and Determined Properties", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27, 1, 109-115, 2012.
- [10] Hebner G.A., Abraham I.C., Woodworth J.R., "Characterization of SF₆ / Argon Plasmas for Microelectronics Applications", Sandia National Laboratories, SAND2002-0340 Unlimited Release Printed 2002.
- [11] Tezcan S.S., Dincer M.S., Bektas S, Hiziroglu H.R., "Boltzmann Analysis of Electron Swarm Parameters in Binary CF₄ + Ar Mixtures", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 20, 1, 98-103, 2013.
- [12] Singhasathin A., Pruksanubal A., Tanthanuch N., Rungsevijitprapa W., "Electron Swarm Parameters in Nitrogen Oxygen and Air", *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Krabi, Tayland, 15-17 Mayıs 2013.
- [13] Christophorou L.G., Van Brunt R.J., "SF₆/N₂ Mixtures Basic and HV Insulation Properties", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2, 5, 952-1003, 1995.
- [14] Raju G.R.G., Dincer M.S., "Measurement of Ionization and Attachment Coefficients in SF₆ and SF₆ + N₂", *Journal of Applied Physics*, 53, 12, 8562-8567, 1982.

- [15] Dincer M.S., Aydın T., "Simulation of Limiting Field Behavior in Electron Swarms in SF₆ + N₂ Gas Mixtures", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 1, 1, 139-145, 1994.
- [16] Dincer M.S., Hiziroglu H.R., Bektas S., "The Behavior of N₂ + SF₆ Gas Mixtures Subjected to Orthogonal Electric and Magnetic Fields", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 13, 2, 257-263, 2006.
- [17] Raju G.R.G., Dincer M.S., "Monte-Carlo Simulation of Electron Swarms in Nitrogen in Uniform E X B Fields", IEEE Transactions on Plasma Science, 18, 5, 819-825, 1990.
- [18] Tezcan S.S., Dincer M.S., Hiziroglu H.R., "Prediction of Breakdown Voltages in N₂ + SF₆ Gas Mixtures", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 222-225, 15-18 Ekim 2006.
- [19] Pedersen A., "On the Assessment of New Gaseous Dielectrics for GIS", IEEE Trans. Power App. Syst., 104, 8, 2233-2237, 1985.
- [20] Farish O., Ibrahim O.E., Crichton B.H., "Effect of Electrode Surface Roughness on Breakdown in Nitrogen/SF₆ Mixtures", Proc. IEE, 123, 10, 1047-1056, 1976.
- [21] High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, IEC Standard 60060-1 ed3.0, 2010.
- [22] ASTM International, Designation D 149-97a (reapproved 2004).
- [23] Tezcan S.S., Akcayol M.A., Ozerdem O.C., Dincer M.S., "Calculation of Electron Energy Distribution Functions from Electron Swarm Parameters Using Artificial Neural Network in SF₆ and Argon", IEEE Trans. Plasma Sci., 38, 9, 2332-2339, 2010.
- [24] Tezcan S.S., Duzkaya H., Dincer M.S., Hiziroglu H.R., "Assessment of Electron Swarm Parameters and Limiting Electric Fields in SF₆+CF₄+Ar Gas Mixtures", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 23, 4, 1996-2005, 2016.
- [25] Pinheiro M.J., Loureiro J., "Effective Ionization Coefficients and Electron Drift Velocities in Gas Mixtures of SF₆ with He, Xe, CO₂ and N₂ from Boltzmann Analysis", J. Phys. D: Appl. Phys, 35, 3077-3084, 2002.
- [26] Kurihara M., Petrovic Z.L., Makabe T., "Transport Coefficients and Scattering Cross-Sections for Plasma Modelling in CF₄-Ar Mixtures: A Swarm Analysis", J. Phys. D: Appl. Phys., 33, 2146-2153, 2000.
- [27] Hayashi M. "Bibliography of Electron and Photon Cross Sections with Atoms and Molecules Published in the 20th Century - Argon". http://jila.colorado.edu/~avp/collision_data/electronneutral/hayashi.txt. Yayın tarihi: Haziran 2003. Erişim tarihi Ekim 2016.
- [28] Yanguas-Gil A., Cotrino J., Alves L.L., "An Update of Argon Inelastic Cross Sections for Plasma Discharges", J. Phys. D: Appl. Phys, 38, 10, 1588-1598, 2005.
- [29] Phelps A.V., Pitchford L.C., "Anisotropic Scattering of Electrons by N₂ and Its Effect on Electron Transport", Physical Review A, 31, 5, 2932-2949, 1985
- [30] Haddad A., Warne D., "Advances in High Voltage Engineering, The Institution of Engineering and Technology", United Kingdom, 2004.
- [31] Husain E., Nema R.S., "Analysis of Paschen Curves for Air, N₂ and SF₆ Using the Townsend Breakdown Equation", IEEE Trans. Electr. Insul., 17, 4, 350-353, 1982.